

Sandviç Panellerin Düzlem İçi Yükler Etkisindeki Davranışı ve Çatı Düzlem İçi Rijitliğine Katkıları

IN-PLANE BEHAVIOUR OF SANDWICH PANELS AND THEIR CONTRIBUTION TO ROOF DIAPHRAGM STIFFNESS

ABSTRACT

Sanwich panels are mostly used as enclosures such as roof and wall claddings of precast reinforced concrete (RC) buildings due to their advantages of low self-weight, high thermal insulation property and low workmanship. Sandwich panels consist of two thin steel plates separated by a polystyrene foam core and they are solely designed to transfer the vertical loads. However, in reality sandwich panels contribute to the inplane shear stiffness and diaphragm action ability of precast structures when they are attached to a substructure. In this study, inplane behaviour of sandwich panels were investigated by conducting several cyclic and monotonic experiments in Structural and Earthquake Engineering Laboratory of Istanbul Technical University (STEELab). The motivation of this study is the regulation given in Turkish Earthquake Code (2018) which enforces the sandwich panels to be adapted to three dimensional numerical models in order to take the advantage of inplane roof stiffness. An empirical equation was proposed based on the experimental results. The equation is used to calculate the axial stiffness of the fictitious diagonal struts which simulates the inplane sandwich panel behaviour. Since the proposed equation considers sheet tearing response; it better

represents the experimental results than the ones proposed in Turkish Earthquake Code (2018). A number of 3D analytical models were generated for a typical RC precast structure to comprise sandwich panels effect and the roof inplane displacements were compared.

1. ÖZET

Sandviç paneller; hafiflik, üstün yalıtım özellikleri, uygulama kolaylığı gibi nedenlerle farklı taşıyıcı sistemlere sahip sanayi yapılarının çatı ve cephelerinde örtü malzemesi olarak kullanılmaktadır. İki taşıyıcı ince levha ile onlar arasına yerleştirilmiş yalıtım malzemesinden oluşan kesite sahiptirler. Sandviç paneller düzlemlerine dik doğrultuda etkiyen özağrılık, kar, rüzgar, montaj vb. yükleri taşıyacak şekilde boyutlandırılırken, düzlem içi rijitlik ve dayanım özellikleri genelde dikkate alınmamaktadır.

Bu çalışmada; ülkemizde üretilen ve yaygın olarak kullanılan sandviç panel tiplerinden bazılarının düzlem içi yükler etkisindeki davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği-2018'de çatı düzlem içi rijitliğini sağlamak üzere sandviç panellerin de yapının üç boyutlu taşıyıcı sistem modeline eklenmesi önerisi, bu çalışmanın çıkış noktası olmuştur. Gerçekleştirilen deneysel çalışma sonuçlarına dayalı olarak, sandviç panellerin düzlem içi davranışını temsil edebilen eşdeğer çapraz sistemin, eleman rijitliklerini belirlemeye yönelik bir bağıntı önerilmiştir. Bu bağıntı, davranış



Prof. Dr. Ercan YÜKSEL

İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden 1987 yılında mezun olmuştur. İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Mühendisliği Programında 1990 yılında yüksek lisans, 1998 yılında doktora çalışmalarını tamamlamıştır. 1993'de Tokyo Üniversitesi ve Building Research Institute'de, 2004'de New York State University at Buffalo'da bilimsel çalışmalar yapmıştır. Ulusal ve uluslararası araştırma projelerinde görev almıştır. Çok sayıda makale ve bildirisi bulunmaktadır. İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı Sorumluluğu görevini sürdürmektedir.

üzerinde çok etkili olan saç yırtılmasını dikkate alması nedeniyle Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği-2018 Ek8-B'de önerilen ifadeye göre deneysel sonuçları daha iyi temsil edebilmektedir.

Sandviç panellerin betonarme prekast bir sanayi yapısında çatı örtüsü olarak kullanılması durumu için, farklı hesap modelleri oluşturularak analizler yapılmış ve ulaşılan çatı düzlem içi yerdeğiştirmeleri karşılaştırılmıştır.

2. GİRİŞ

De Matteis ve Landolfo (1999), 1/1 ölçekli sandviç paneller üzerinde ele-

man ve sistem deneyleri yapmıştır. Tersinir tekrarlı statik yükler kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde, panellerin belirli yerdeğiştirme adımlarında bağlantı noktalarında gözlenen yırtılmalarından dolayı, düşük enerji tüketme kapasitesine sahip oldukları belirtilmiştir. Sandviç panellerin düzlemleri içinde yeterli dayanım ve rijitliğe sahip olabilmeleri için bağlantı şekillerinin geliştirilmesi gerektiği bildirilmiştir. Mahendran ve Subaaharan (2002) bağlantı sayısı, kalınlık, en/boy oranı gibi değişkenlerin dayanım ve rijitlik özellikleri üzerindeki etkisini incelemek amacıyla düzlemi içinde yüklü sandviç paneller üzerinde bir seri deneysel çalışma yapmıştır. Sandviç panel kayma dayanımının levha kalınlığına bağlı olmadığı gösterilmiştir. Uygulamada kullanılan bağlantı şekli dolayısıyla, sandviç panellerin gerçek kayma kapasitesinin tam olarak kullanılamadığı ifade edilmiştir. Bağlantı biçiminin geliştirilmesiyle kayma dayanımının yaklaşık 2.5 kat, kayma rijitliğinin de 4 kat artırılacağı belirtilmiştir. Dawood ve Peirick (2012) cam elyaftan üretilmiş sandviç paneller üzerinde düzlem içi yükleme yapmıştır. Deneyler, panel elemanların düzlem içi davranışlarının daha çok düzlem dışı rijitliklerine bağlı olduğunu göstermiştir. Fudzee ve Hamid (2013) sandviç panellerin düzlem içi davranışını belirlemek üzere tersinir tekrarlı statik deneyler yapmıştır. Deney sonuçlarına göre, hasarın büyük bölümü bağlantı bölgelerinde levha yırtılması şeklinde oluşmuştur. Paneli oluşturan alüminyum levhaların burkulması haricinde, panel orta bölgesinde hasar oluşmamıştır. Mostafa vd. (2013) cam elyaf levhalar arasına sıkıştırılmış polivinil klorür dolgu malzemeli sandviç panellerin çekme, basınç ve kayma davranışını incelemiştir. Düzlem içi kayma deneylerinde, sand-

viç panellerin baskın göçme modunun levha ayrılması olduğu bildirilmiştir.

Bu çalışmada, ülkemizde üretilen ve yaygın olarak kullanılan bazı sandviç panel tipleri üzerinde eleman ve sistem deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarla ilgili ayrıntılı bilgi Saghayesh (2017) ve Yüksel vd. (2019)'de yer almaktadır. Sandviç panel düzlem içi davranışının eşdeğer çapraz sistemi ile temsil edilebilmesi için, saç kalınlıklarının da dikkate alan bir bağlantı önerilmiştir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

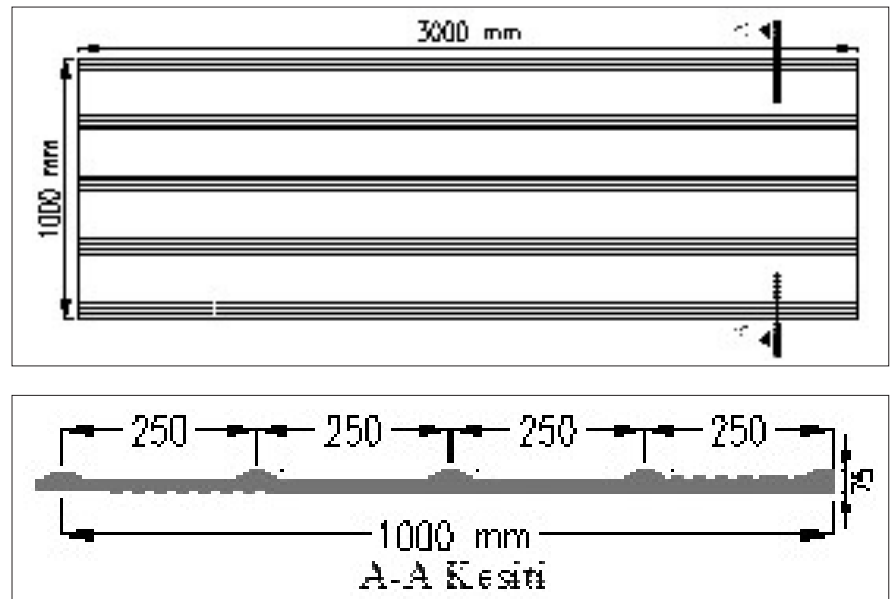
Deneysel çalışmada iki ve dört hadveli, toplam kesit yüksekliği 75 mm, hadve yüksekliği de 32 mm olan sandviç paneller kullanılmıştır, Şekil 1. Saç kalınlıkları hadveli yüzde 0.4 mm, düz yüzde ise 0.5 mm dir.

Bağlantı için kullanılan trifon vida sayısı ile yükleme doğrultusunun düzlem içi davranışa olan etkilerinin tartışılması amacıyla iki grup deneysel çalışma yapılmıştır. İlk grup (eleman deneyleri), düzlemleri içerisinde tek yönlü çekme etkisine maruz bırakılan küçük



Doç. Dr. Hasan ÖZKAYNAK

Antalya'nın Akseki ilçesinde 1978 yılında doğmuştur. Lisans ve Yüksek Lisans eğitimini 2000 ve 2002 yıllarında İstanbul Teknik Üniversitesi'nde tamamlamıştır. Doktora çalışmasını 2010 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Deprem Mühendisliği Programında bitirmiştir. Doçentlik ünvanını, T.C. Üniversitelerarası Kurul Başkanlığı'ndan 2018 yılında almıştır. Halen Beykent Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesinin İnşaat Müh. Bölümünde öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır. Uluslararası indekslerde taranan dergilerde 14 adet makalesi, ulusal ve uluslararası bilimsel toplantılarda sunulmuş birçok bildirisi vardır. Yayınları çok sayıda atf almıştır. Ulusal ve uluslararası araştırma projelerinde araştırmacı olarak görev yapmıştır.



Şekil 1. Sandviç panel geometrik özellikleri



Eleman Deneyleri



Sistem Deneyleri

Şekil 2. Eleman ve sistem deneyleri için oluşturulan düzenekler

numunelerden oluşmaktadır. İkinci grup (*sistem deneyleri*) ise betonarme aşıklara trifon vidalar ile bağlanmış büyük sandviç panellerden oluşan numuneleri içermektedir, Şekil 2.

3.1 Eleman Deneyleri

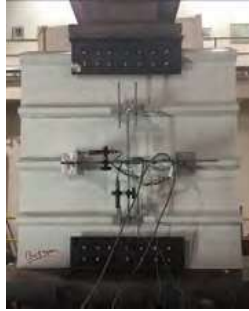
1000×1000 mm boyutlarındaki dört hadveli sandviç paneller, hadvelere dik ve hadveler doğrultusunda olmak üzere çekme etkisine maruz bırakılmıştır.

bölgelerinde 14 trifonun kullanıldığı ve yüklemenin hadveler doğrultusunda yapıldığı numunedir, Şekil 3. Bu gruptaki numuneler için 8 mm çaplı trifon vidalar kullanılmıştır.

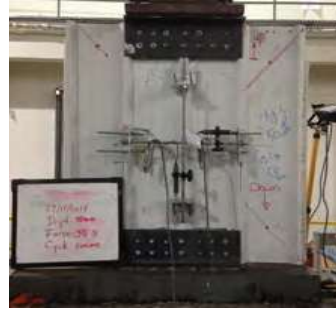
Eleman çekme deneylerinde elde edilen yük-yerdeğiştirme ilişkileri Şekil 4'te verilmiştir. Grafiklerdeki yerdeğiştirme büyüklükleri, gerçekleşen toplam yırtılma ve uzama hareketlerini içermektedir.



H4C7HD



H4C14HD



H4C14HP

Şekil 3. Birinci grup (eleman deneyleri) numuneler

Mesnet ve yükleme bölgelerinde kullanılan trifon vida sayısı ile yükleme doğrultusunun davranışa olan etkileri incelenmiştir.

H4C7HD numunesinin mesnet ve yükleme bölgelerinde 7 adet trifon vida kullanılırken, H4C14HD de 14 adet kullanılmıştır. Bu iki numunede yükleme hadvelere dik doğrultuda yapılmıştır. H4C14HP, mesnet ve yükleme

Trifon vida sayılarındaki değişim, mesnetlenme özelliklerinde ve sandviç panel yük ve yerdeğiştirme kapasitelerinde farklılık oluşturmuştur. H4C14HD numunesinde 22 kN luk taşıma kapasitesine ulaşılırken, H4C7HD numunesinde elde edilen en büyük dayanım 13 kN olmuştur. Yüklemenin hadve doğrultusunda yapıldığı H4C14HP numunesinde ise 42 kN değerine ulaşılmıştır.



Dr. Cihan SOYDAN

Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 1998 yılında mezun olmuştur. Trakya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde 1999 yılında araştırma görevlisi olarak çalışmaya başlamıştır. 2001 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi'nde yüksek lisans eğitimini tamamlamıştır. 2015 yılında "Yeni Bir Sönümleyici Eleman ve Prefabrike Yapı Sistemlerindeki Moment Aktarmayan Birleşimlere Uygulanması" başlıklı çalışması ile İstanbul Teknik Üniversitesi'nden doktora derecesini almıştır. 2015 yılından itibaren Namık Kemal Üniversitesi Çorlu Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde Arş.Gör.Dr. olarak çalışmaktadır. Geometri ve malzeme bakımından doğrusal olmayan sistemlerin dinamik ve statik analizi ile enerji sönümleyiciler hakkında deneysel ve nümerik çalışmalarda bulunmaktadır.

Bağlantı bölgesinde 7 trifon vidanın kullanıldığı H4C7HD numunesinde gerçekleşen toplam yerdeğiştirme (uzama ve yırtılmalar toplamı), 14 trifonun kullanıldığı H4C14HD numunesine göre yaklaşık iki kat daha büyüktür. H4C14HD numunesinde trifon vida delikleri etrafındaki yırtılmalar çok sınırlı kalmıştır, Şekil 5.

Trifon vida sayısı panelin yük taşıma kapasitesi üzerinde çok etkili olmaktadır. Trifon vida sayısı artırıldığında, vida başına düşen kesme kuvveti azalmakta ve delik çevrelerinde gerçekleşen yırtılmalar engellenebilmektedir.

Yükleme doğrultusu da sandviç panelin düzlem içi yük taşıma kapasitesi üzerinde çok etkili olmuştur. Yüklemenin hadveler doğrultusunda yapıldığı H4C14HP numunesinde, delik çevrelerinde oluşan büyük şekildeğişimlerden önce numune orta bölgesinde saç levhalarda akmaya erişilmiştir.

Sandviç panel mesnetlenme bölgelerinde trifon vida delikleri çevresinde gerçekleşen yırtılma, bu bölgelerde levha kalınlıklarını ve trifon vida sayısını artırarak önlenebilir.

İncelenen sandviç panellerde hadvelere dik ve paralel doğrultuda yapılan çekme deneylerinde, elastisite modülü olarak sırasıyla 78500 MPa ve 89500 MPa değerleri elde edilmiştir. İncelenen paneller için, ortalama elastisite modülü olarak 84000 MPa değeri önerilmiştir, (Yüksel vd. 2019).

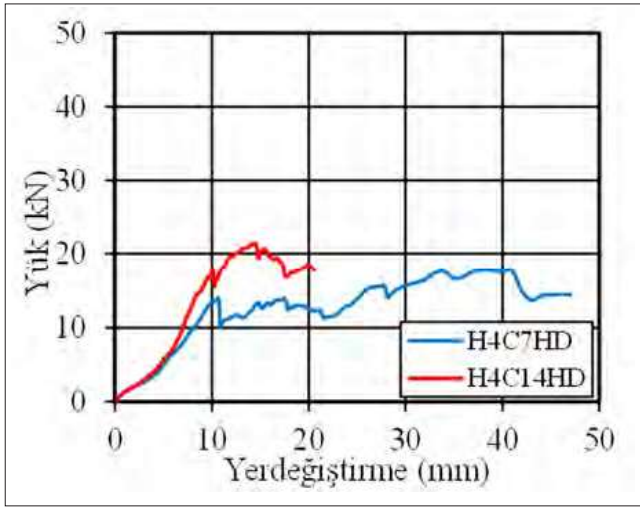
3.2 Sistem Deneyleri

1000×3000 mm boyutlarındaki iki sandviç panelin, aşıkları temsil eden ve aralarındaki mesafe 2400 mm olan betonarme kirişlere 4 mm çaplı trifon vidalar ile bağlanmasıyla oluşturulan örtü sistemleri, düzlemleri içinde yön değiştiren tersinir yüklemeye maruz bırakılmıştır. Çelik profillerden oluşturulmuş labil deney çerçevesine bağlanan numuneler, hadveler doğrultusunda ve dik doğrultuda yüklenerek, davranışları incelenmiştir. Yüksel vd. (2019), üçü hadveler doğrultusunda üçü de hadvelere dik doğrultuda olmak üzere toplam 6 adet sistem deneyi gerçekleştirmiştir. Bu yazıda; iki hadveli sandviç paneller üzerinde gerçekleştirilen, trifon vida dağılımı ve yükleme doğrultusunun etkisinin tartışıldığı üç sistem deneyine yer verilmiştir.

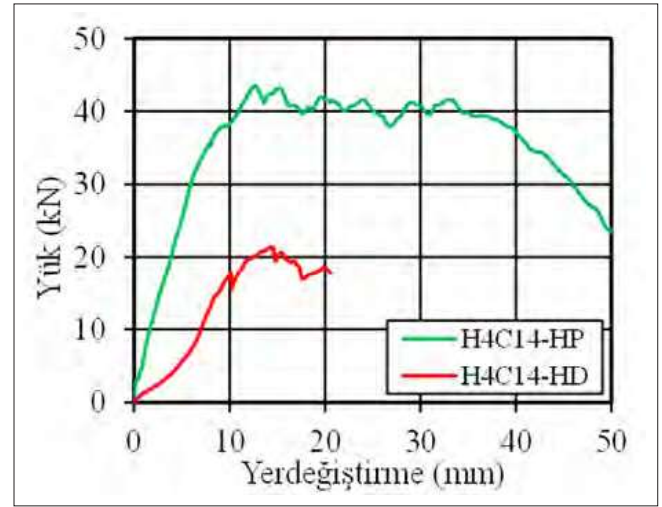


Dr. Ahmet GÜLLÜ

Ankara Keçiören'de 1987 yılında doğmuştur. Lisans eğitimini 2010 yılında Yıldız Teknik Üniversitesinde tamamladıktan sonra Yüksek Lisans ve Doktora eğitimlerini sırasıyla 2012 ve 2018 yıllarında İstanbul Teknik Üniversitesinde tamamlamıştır. Uluslararası indekslerde taranan dergilerde yayınlanmış makaleleri ve uluslararası toplantılarda sunulmuş bildiri-leri bulunmaktadır. Farklı projelerde araştırmacı olarak görev almıştır. Evli ve bir çocuk babasıdır.



H4C7HD / H4C14HD

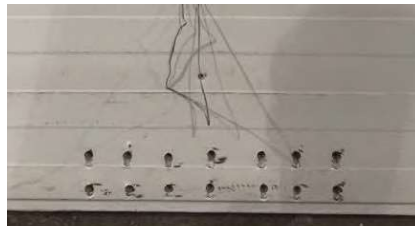


H4C14HD / H4C14HP

Şekil 4. Eleman deneylerinden elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrileri



H4C7HD



H4C14HD



H4C14HP

Şekil 5. Mesnet bölgelerinde trifon vida delikleri civarında gözlenen yırtılmalar

H2N1 numunesinde paneller betonarme aşıklara her hadvede birer trifon vida kullanılarak bağlanmıştır. *H2N2* de, her hadvede ikişer adet trifon vida kullanılmıştır. Sandviç panellerin üst üste bindirildiği kesitlerde, betonarme aşıkla bağlantı *H2N1* numunesinde bir adet, *H2N2* numunesinde ise üç adet trifon vida ile sağlanmıştır. *H2N3* numunesinin tüm özellikleri *H2N2* ile aynı olup, tek farklılık yükleme doğrultusudur. Deney numuneleri Şekil 6'da görülmektedir.

Panellerin farklı noktalarında gerçekleşen yerdeğiştirmeleri kaydetmek üzere çok sayıda yerdeğiştirme ölçer kullanılmıştır.

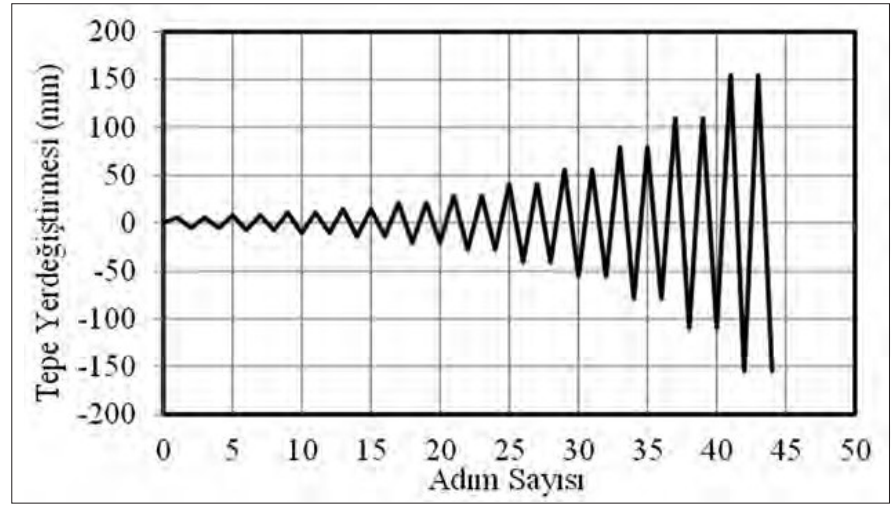
Sistem deneylerinde uygulanan ve deprem etkisini temsil eden yerdeğiştirme protokolü Şekil 7'de verilmiştir.

Elde edilen yük-yerdeğiştirme ilişkileri Şekil 8'de karşılaştırılmıştır. *H2N2* de elde edilen en büyük dayanım 15 kN iken, *H2N1* 6.5 kN seviyesinde kalmıştır. Trifon vida sayısının iki kat artırıldığı *H2N2* numunesinde sistem dayanımı yaklaşık iki kat artmıştır.

Yüklemenin hadve doğrultusunda yapıldığı *H2N3* numunesinde ulaşılan en



Şekil 6. İkinci grup (sistem deneyleri) numuneler

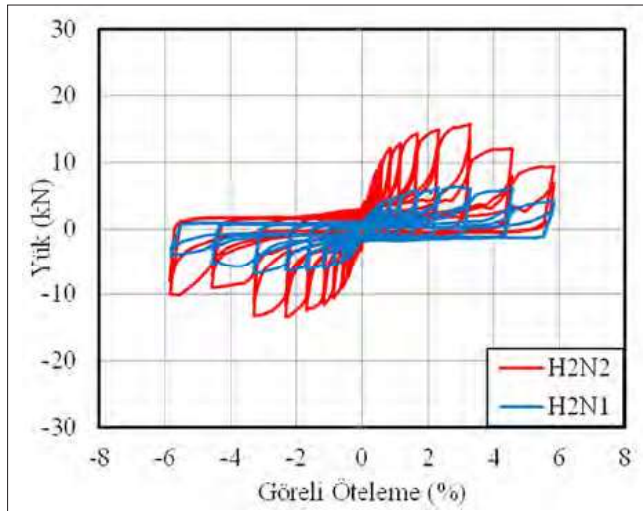


Şekil 7. Sistem deneylerinde kullanılan yerdeğiştirme protokolü

büyük dayanım *H2N2* ye göre %45 artışla 22 kN olmuştur.

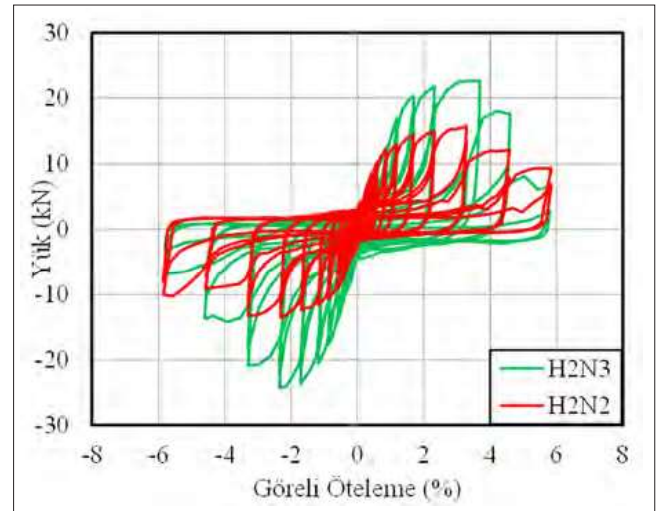
İki panelin üst üste bindirildiği bölgelerde farklı davranış biçimleri elde edil-

miştir, Şekil 9. Birleştirilen iki panelin görelî düşey hareketi, tek trifonlu durumda büyük iken üç trifonlu durumda oldukça küçülmüştür. Paneller arasın-



H2N2 - *H2N1*

Şekil 8. Sistem deneylerinde elde edilen yük-yerdeğiştirme ilişkileri



H2N2-*H2N3*

da yük aktarımı H2N2 numunesinde iyileşmekte, bu da genel sistem davranışına yansımaktadır. Deneylerde saç levha yırtılmasının yanı sıra trifon vida kırılması da gözlenmiştir, Şekil 9.

Yüklemenin hadve doğrultusunda yapıldığı H2N3 numunesinde, bindirme bölgesinde paneller arasında daha büyük yerdeğiştirme farkı oluşmuştur.

Hasar durumları incelendiğinde, tersinir tekrarlı yükler etkisinde trifon vida

panel saç kalınlığının artırılmasının saç yırtılmasını geciktireceği/önleyeceği, böylelikle sandviç panelde daha büyük düzlem içi rijitlik ve dayanımlara ulaşılacağı öngörülmektedir.

4. KURAMSAL ÇALIŞMA

Bir prekast betonarme yapıda, sandviç panellerin çatı örtü malzemesi olarak kullanımı halinde çatı düzlem içi rijitliğine olan katkıları sayısal olarak incelenmiştir.

m, kolon yüksekliği de 8.2 m dir. Beton sınıfı C30, donatı çeliği sınıfı da S420 dir.

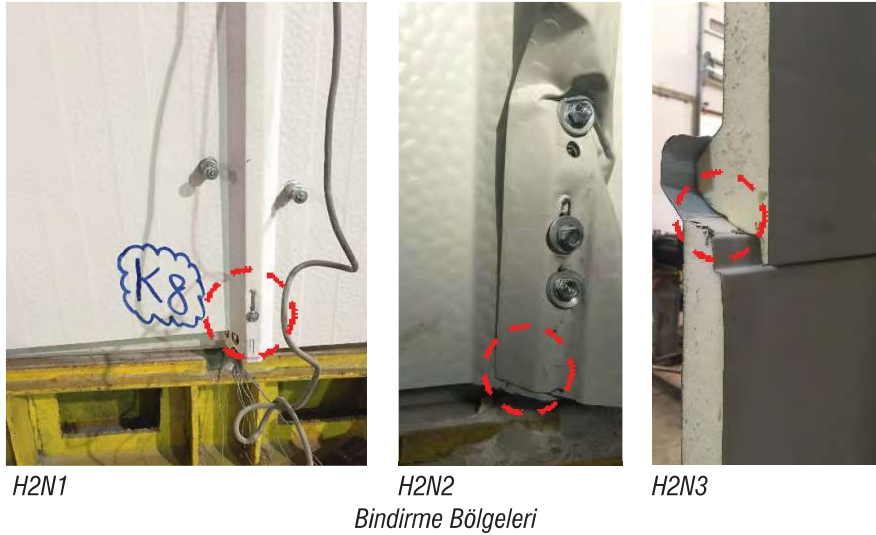
Kolon kesiti 500×500 mm olup, %1.0 boyuna donatı oranına sahiptir. Çerçeve düzleminde, eğik çatı kirişleri 400×500 mm boyutlarındaki kolon kısa konsollarına mafsallı olarak bağlanmaktadır. Eğik çatı kirişi, oluk kirişi ve aşıklara ait geometrik özellikler Şekil 10c ve 10d de verilmiştir. Oluk kirişleri, uzun doğrultuda kolonlara mafsallı olarak bağlanmıştır. Eğik çatı kirişi üst başlık düzleminde 2 m aralıklarla yerleştirilmiş T kesitli prekast aşıklar kullanılmıştır.

Betonarme elemanların öz ağırlıkları yanında, çatı örtü malzemesi öz ağırlığı 0.12 kN/m², kar yükü de 0.75 kN/m² olarak dikkate alınmıştır.

Hesap modelinin hazırlanmasında *Seismo-Struct* yazılımı kullanılmıştır. Kolon kesitlerinde sargılı ve sargısız beton davranışı *Mander* modeli ile, donatı çeliğinin davranışı ise *Menegatto Pinto* modeli ile temsil edilmiştir. Yerdeğiştirme esaslı eleman tipi seçilmiş, doğrusal olmayan şekildeğiştirmeler yayılı olarak dikkate alınmıştır. Eğik çatı kirişleri, oluk kirişleri ve aşıklar ise elastik çubuk elemanlar olarak tanımlanmıştır. Aşıkların eğik çatı kirişlerine bağlantısında, çatı düzleminde mafsallı (HM#1 ve HM#2) ve moment aktaran (HM#3 ve HM#4) birleşim şekilleri çalışılmıştır.

4.2 Çatı Örtüsünün Hesap Modeli

Sandviç panellerden oluşturulan çatı örtüsünün sağladığı düzlem içi rijitliği temsil etmek üzere, Şekil 10b de verilen hesap modeli oluşturulmuştur. Eşdeğer çubuk sistemde kullanılacak *pandül çubukların* aksenal rijitliği $((k)_e)$ Denklem (1) ile hesaplanabilir, Yüksel vd. (2019). Denklemde yer alan değiş-



Şekil 9. Sandviç panel mesnetlenme bölgelerinde gözlenen hasar durumu

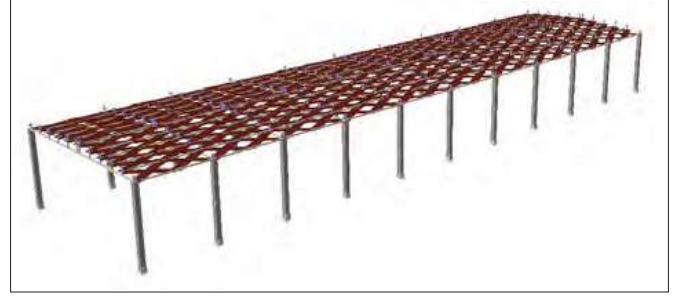
deliklerinin adım adım genişlediği ve panel düzlemindeki etkilerin aşıklara aktarımını olumsuz etkilediği görülmektedir. Trifon sayısında artışa gidilmesinin ve/veya mesnet bölgelerinde

4.1 Prekast Betonarme Yapının Üç Boyutlu Hesap Modeli

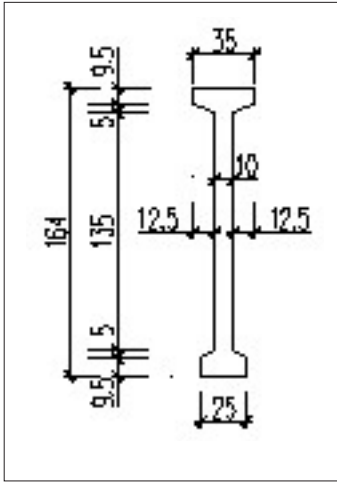
Taşıyıcı çerçeveleri 20 m açıklıklı olan tek katlı bir sanayi yapısı incelenmiştir, Şekil 10a ve 10b. Çerçeve aralıkları 8



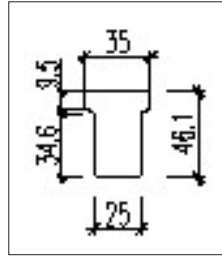
a) Yalın çerçeve hesap modeli (HM#1)



b) Çatı örtüsünün eşdeğer çaprazlar ile temsil edildiği hesap modeli (HM#2,3,4 ve HM#SR)

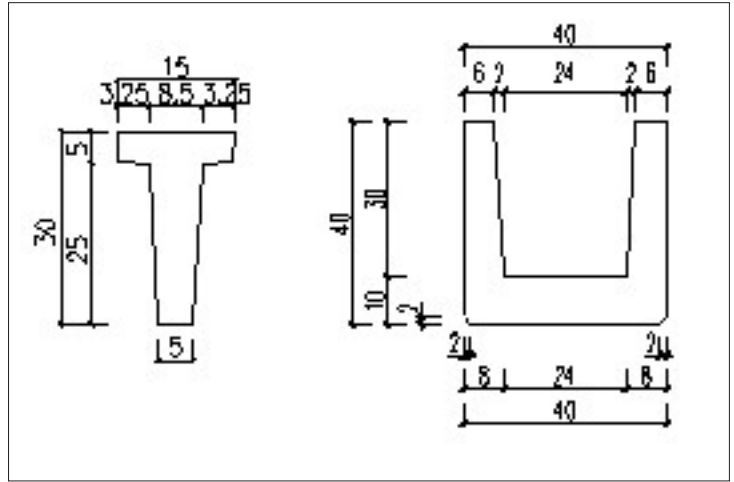


Mahya Kesiti



Mesnet Kesiti

c) Eğik Çatı Kirişi Geometrik Ölçüler (Tüm ölçüler cm)



d) Aşık ve Oluk Kiriş Kesitleri (Tüm ölçüler cm)

Şekil 10 İncelenen prekast yapı için hazırlanan hesap modelleri ve bazı elemanlara ait kesit bilgileri

kenlerin tanımları Tablo 1 de verilmiştir. Denklemin sağ tarafında yer alan değişkenlere uygun sayısal değerler atandıktan sonra $(k)_e$ değeri hesaplanır. Taşıyıcı sistem hesap modelinde yer alan ve boyu (L_p) olan eşdeğer pandül çubuklara (ExA) ataması yapılır.

$$(k)_e = \frac{ExA}{L_p} = \left(\frac{\pi}{0.02} \right) x \left(\frac{D x (t_1 + t_2) x n x f_y}{L} \right)_{xy} \quad (1)$$

(1) denklemini $H2N1$, $H2N2$ ve $H2N3$ numuneleri için kullanıldığında ulaşılan eşdeğer çapraz rijitlikleri Tablo 2 de verilmiştir. Bu değerler, Şekil 8 de yer alan yük-yerdeğiştirme ilişkilerinin başlangıç rijitliklerine karşı gelmektedir.

4.3 Analizler ve Sonuçları

Sandviç panel çatı örtüsü; aşıklar, oluk kirişleri ve eğik çatı kirişlerinin konumları dikkate alınarak, Şekil 11 de görülen eşdeğer çubuk sistem modeli ile temsil edilmiştir. Sandviç panelin aşıklara her hadvede bir trifon vida kullanılarak bağlandığı durum esas alınmış ve eşdeğer pandül çubukların aksel rijitliği 262 N/mm olarak hesaplanmıştır.

Çatı örtüsünün varlığının ve aşık uç bağlantı tipinin yapısal davranışa olan etkilerinin irdelenebilmesi amacıyla, dört ayrı hesap modeli oluşturulmuştur, Tablo 3. Ayrıca, çatı düzleminin sonsuz rijit olduğu hesap modeli de oluşturulmuştur ($HM\#SR$).

Tasarım ivme spektrumuna göre

hesaplanan taban kesme kuvveti ($\sum V_7 = 570 \text{ kN}$); Denklem 2 ile Q yüküne dönüştürülerek, tüm hesap modellerine çatı düzleminde yük alanlarıyla orantılı olarak etkilmiştir, Şekil 11. Bu yükleme durumu için, *doğrusal olmayan statik analiz* yapılmıştır.

$$Q = \sum V_i / 10 \quad (2)$$

Çatı düzlem içi rijitliğini irdelemek üzere, tüm hesap modellerinde elde edilen çatı düzlemindeki yatay ötelenmeler Şekil 12'de karşılaştırılmıştır. Grafikte $HM\#SR$ çatı düzlem içi rijitliğinin sonsuz olduğu ideal durumu göstermektedir.

$HM\#1$ de kenar ve ara çerçevelerde çatı düzleminde gerçekleşen yerdeğiştirmeler sırasıyla 0.063 m ve 0.154

Tablo 1. Denklem (1) de kullanılan değişkenlerin tanımları

Değişken	Tanım
$(k)_e$	Pandül çubuk eşdeğer aksenal rijitliği (N/mm)
E	Elastisite modülü (N/mm ²)
A	Enkesit alanı (mm ²)
L_p	Pandül çubuk boyu (mm)
π	Pi sayısı
D	Trifon vida çapı (mm)
t_1, t_2	Sandviç panelin üst ve alt saç katmanlarının kalınlıkları (mm)
n	Birim uzunlukta kullanılan trifon vida sayısı (adet/m)
f_y	Saç levha akma dayanımı (N/mm ²)
γ	Yükleme doğrultusu etkisini ve deneysel belirsizlikleri temsil etmek üzere önerilen güvenlik katsayısı; 0.67 alınabilir.
L	Aşıklar arası mesafe (mm)

Tablo 2. Sistem deneyleri için (1) denklemlle hesaplanan rijitlikler

Tests #	D mm	n adet/m	f_y N/mm ²	t_1+t_2 mm	L_p mm	L mm	γ	k N/mm
H2N1	4	2.5	255	0.9	2600	2400	0.5	150
H2N2	4	5.5	255	0.9	2600	2400	0.5	330
H2N3	4	5.5	255	0.9	2600	2400	0.9	330

Tablo 3. Hazırlanan hesap modellerinin özellikleri

Hesap Modeli	Sandviç panel çatı örtüsü dikkate alınıyor	Aşık uçları çatı düzleminde rijit bağlı
HM#1	Hayır	Hayır
HM#2	Evet	Hayır
HM#3	Hayır	Evet
HM#4	Evet	Evet

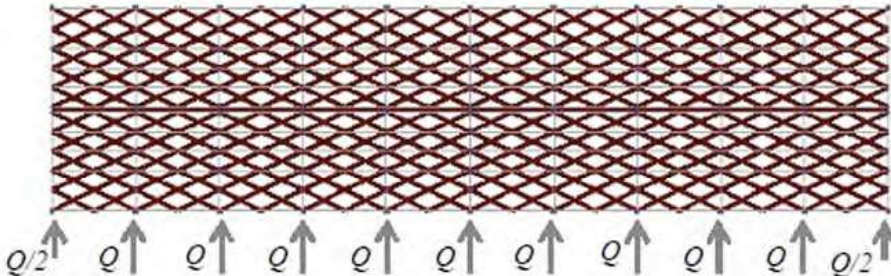
m dir. Aralarındaki oran %41'e karşı gelmektedir. HM#2 de gerçekleşen kenar ve ara çerçeve yerdeğiştirmeleri 0.101 m ve 0.147 m olup, oran %69'a yükselmiştir. HM#3, HM#2 ye benzer bir davranış göstermiştir. Bu modelde

kenar ve ara çerçevelerde gerçekleşen yerdeğiştirmeler sırasıyla 0.108 m ve 0.147 m olup, oran %73 olmaktadır. HM#4 de kenar ve ara çerçeveler arasındaki yerdeğiştirmeler 0.111 m ve 0.140 m dir, oran ise %80 çıkmaktadır.

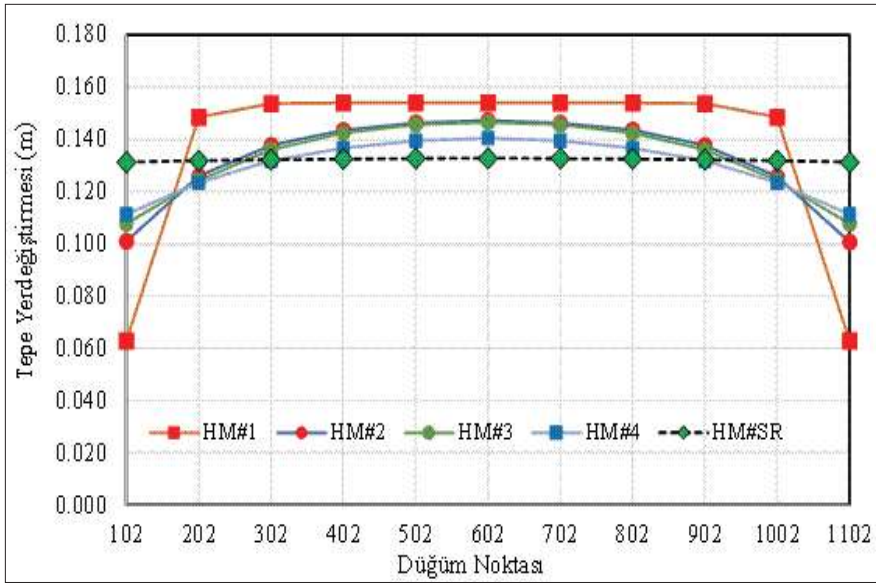
5. SONUÇLAR

Sandviç panellerin düzlem içi yükler etkisindeki davranışının belirlenmesi için eleman ve sistem düzeyinde deneyler yapılmıştır. Trifon vida sayısı ve yüklem doğrultusu incelenen önemli değişkenler arasındadır. Sandviç panellerin, prekast betonarme taşıyıcı sistemlerde çatı düzlem içi rijitliğine olan katkıları, oluşturulan hesap modelleri üzerinden tartışılmıştır. Ulaşılan önemli sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- Eleman deneylerinde, sandviç panelde saç yırtılması göçme moduyla karşılaşılmıştır.
- Sistem deneylerinde, hem saç yırtılması hem de trifon vidaların kırılması göçme moduyla karşılaşılmıştır.
- Trifon vida çapı ve sayısı sandviç panel yük taşıma kapasitesini doğrudan etkilemektedir. Uygun çaptaki trifon vida sayısının artırılmasıyla trifon başına düşen kesme kuvveti azalmakta bu da saç levha yırtılması geciktirmektedir. Eleman deneylerinde 7 yerine 14 trifon vida kullanıldığında gerçekleşen en büyük dayanım 2 katına çıkmıştır.
- Sistem deneylerinde; her hadvede iki trifon vidanın kullanıldığı H2N2 ile her hadvede bir trifon vidanın kullanıldığı H2N1 numunelerinin sonuçları karşılaştırıldığında, düzlem içi kayma dayanımının iki kat arttığı görülmüştür. Trifon vida sayısında artışa gidilmesinin ve/veya sandviç panel mesnet bölgelerinde saç kalınlığının artırılmasının saç yırtılmasını geciktireceği/önleyeceği, böylece sandviç panelden elde edilecek düzlem içi rijitlik ve dayanım değerlerinin büyüyeceği öngörülmektedir.
- Sayısal örnekte kenar ve ara çerçeveler arasında çatı düzleminde



Şekil 11. Tasarım spektrumuna göre hesaplanan eşdeğer deprem yükünün dağılımı



Şekil 12. Oluşturulan hesap modellerinde çatı düzleminde gerçekleşen yatay ötelenmeler

gerçekleşen yerdeğiştirme oranları; aşıkların çatı düzleminde mafsallı bağlandığı ve sandviç panelin dikkate alınmadığı durumda (HM#1) 0.41, sadece sandviç panelin dikkate alındığı durumda (HM#2) 0.69, sadece aşık uç bağlantılarının rijit olduğu durumda (HM#3) 0.73 ve hem sandviç panelin dikkate alındığı hem de aşık uç bağlantılarının rijit olduğu durumda (HM#4) 0.80 olmuştur. Kenar ve ara çerçeveler arasındaki yerdeğiştirme oranının 1.0 e yaklaşması, çatı düzlem içi rijitliğinin sonsuz olduğu ideal duruma yaklaşıldığını göstermektedir.

- Bu çalışmada önerilen (1) Denklemi, sandviç panelin düzlem içi davranışı üzerinde çok etkili olan

saç yırtılmasını dikkate alması nedeniyle, deneysel sonuçları temsil etmede Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği-2018 Ek8-B'de yer alan denkleme göre daha başarılı olmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 18 Mart 2018, Resmi Gazete 30364 (Mükerrer) sayısı.
- [2] De Matteis, G., Landolfo, R. [1999] "Structural behavior of sandwich panel shear walls: an experimental analysis", Materials and Structures, 32, 331-341.
- [3] Mahendran M, Subaaharan S. [2002] "Shear strength of sandwich panel systems", Australian Journal of Structural Engineering, 3(3), 115-126.

- [4] Dawood M, Peirick L. (2012) "Connection development and in-plane response of glass fiber reinforced polymer sandwich panels with reinforced cores", Canadian Journal of Civil Engineering, 40(11), 1117-1126.
- [5] Fudze MFM, Hamid NHY (2013) "Seismic performance of insulated sandwich wall panel subjected to lateral cyclic loading", In Proceedings: International Conference on Advanced Materials Engineering and Technology, 28-29 November 2013, Bandung, Indonesia.
- [6] Mostafa A, Shankar K, Morozov EV (2013) "Insight into the shear behavior of composite sandwich panels with foam core", Materials & Design 50, 92-101.
- [7] Saghayesh A.M, "Inplane Behaviour of Sandwich Panels", İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Mühendisliği Programı, Haziran 2017.
- [8] Yüksel, E., Saghayesh, A.M., Güllü, A., Özkaynak, H., Soydan, C., Khajehdehi, A., Senol E., (2019), Composite Structures dergisi için hazırlanıyor.
- [9] SeismoStruct, Computer program for static and dynamic nonlinear analysis of framed structures (<http://www.seissoft.com>).

TEŞEKKÜR

Türkiye Prefabrik Birliğinin desteklediği bu araştırma, İTÜNOVA Teknoloji Transfer Ofisinde AR-GE projesi olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın her aşamasındaki değerli katkılarından dolayı İnş. Müh. Günkut BARKA ve İnş. Yük. Müh. Hakan ATAKÖY'e, deneylerin gerçekleştirildiği İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarına (YDMLab) ve İnş. Yük. Müh. Hakan SARUHAN'a teşekkür ederiz.